رفتار سازه‌ای کانال‌های درون‌شهری پر شده با انواع مخلوط CLSM حاوی مصالح بازیافتی*

محمدکاظم شربتدار [۱]

چکیده مخلوط‌های کم‌مقاومت روان (CLSM) بدون نیاز به تراکم در محل‌های مورد نیاز به‌عنوان پر کننده در پرکردن کانال‌های حفاری شده برای لوله‌های تأسیسات شهری استفاده می‌شوند. در این مقاله کارهای آزمایشگاهی آزمونه‌های مکعبی کوچک و کانال بزرگ ساخته شده با مخلوط بتن روان کم مقاومت انجام شد که نتایج مقاومت فشاری ۱۲ طرح نشان دهنده‌ی تولید بتن‌هایی بسیار روان است با نسبت آب به سیمان بالای ۲ با مقاومت‌های متفاوت که برای جایگزینی با خاکریزهایی با تراکم نامناسب و کاهش نشست آسفالت متناسب است. کانال‌های بزرگ آزمایشگاهی و خیابانی، بارهای متمرکزی بین ۳/۵ تا ۷ تن را که در حدود بار چرخ کامیون ٤٥ تنی آئین‌نامه‌های طراحی جاده‌ها و پل‌ها است که بعد از دو ماه با نشست بسیار اندک همراه بودند و رفتار سازه‌ای مناسب داشت.

واژه‌های کلیدی بتن (CLSM)، خاکستر بادی، کانال لوله‌ها، طرح اختلاط بهینه، نشست، مقاومت فشاری، رفتار سازه‌ای، طراحی روکش.

Structural Behavior of in-city canals filled with different CLSM containing Recycled Aggregated

M.K. Sharbatdar

Abstract *Compacted Low strength material (CLSM) made with material such as fly ash and recycled aggregates is used as filler at city infrastructure canals without compaction need. Experimental small specimens and large canals were casted with this concrete and tested to give several results. Test results of compression strengths on 12 different designs shows that this concrete with high workability and w/c ratio over 2 can be replaced with low compacted filled soils and can reduce asphalt settlement over city pavements. Large CLSM canals inside and outside of laboratory tolerated concentrated loads from 3.5 to 7 ton about standard 45-ton Truck (at Bridge and pavement design codes) with low settlement after two months and showed acceptable structural behavior.*

Keywords CLSM concrete, Fly ash, Canals, concrete design, settlement, compression strength, pavement design.

★تاریخ دریافت مقاله ۹۰/٦/۱ و تاریخ پذیرش آن ۹۲/۷/١٤ می‌باشد.

(۱) دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان.

مقدمه

مصالح با مقاومت کم کنترل شده یک ماده سیمانی خود متراکم است که به عنوان یک ماده‌ی پرکننـده در محـل پرکننده‌های متراکم استفاده می‌شود و به‌صورت خاکریز روان، پرکننـده بـا چگـالی تنظـیم شـده، مـلات روان، مخلوط سیمانی خاکی خمیـری، و عبـارت‌هـای دیگـر بیان می‌شود و اطلاعاتی درباره کاربردها، خصوصـیات مصالح، نسـبت‌هـا، سـاخت و اجـرا و مراحـل کنتـرل کیفیت آن توسط مراجع معتبر علمی جهانی و بعضی از شرکت‌های اجرائی جهانی با نگرش مراحـل اجرائـی و کاربردها و نیز به‌وسیله‌ی محققان و پژوهشـگران ارائـه شده‌اند [3-1]. بعضـی از ایـن بـتن‌هـا دارای مقاومـت فشاری ۸/۳ مگاپاسکال یا کمترند بوده تا امکان حفاری این بتن در آینده وجود داشته باشد و فقط انتظار تحمل بارهای پیاده یا خودروی سبک از آنها می‌باشـد و بـه تراکم (تحکیم)، عمل‌آوری برای حصول مقاومت مورد نظر نیاز ندارد. این بتن به‌صورت آماده در یک ترانشـه، یا حفاری‌ها به‌عنوان پرکننده‌هـا ریختـه مـی‌شـود و بـا وجود سیال بودن در هنگام اجرا، بعد از ۲ یا ۳ سـاعت می‌تواند وزن یک شـخص را تحمـل کنـد. اگرچـه در مقایسـه بـا خـاکریز معمـولی دارای قیمـت بـالاتری می‌باشد، خیلی از فواید آن باعث کـاهش هزینـه‌هـا در محل می‌شود [6-4]. ماده‌ی مناسـب بـرای کـف‌سـازی کانال‌های تلفن، برق، لوله و غیره است تـا حفـره‌هـای کف کانال را پر کند و تکیه‌گاه یکنـواختی فـراهم آورد [7,8].

مخلوط‌های معمـولی CLSM معمـولاً شـامل آب، سیمان پرتلند، خاکستر بادی یا تولیدات مشابه، دانه‌های ریز یا درشت یا هر دو می‌باشند. اگرچه مـواد اسـتفاده شـده در ایـن مخلـوط‌هـا مقـررات ASTM و دیگـر استانداردها را رعایت می‌کنند، همیشه اسـتفاده از مـواد کاملاً استاندارد لازم نیست. انتخاب مواد باید براسـاس موجود بـودن، هزینـه، کـاربرد خـاص و خصوصـیات ضروری مخلوط شامل روانی، مقاومت، قابلیت حفاری و چگالی باشد. خاکستر بادی ناشی از سـوخت ذغـال در بعضی اوقات برای بهبود روانی استفاده می‌شـود تـا باعـث افـزایش مقاومـت و کـاهش آب انـداختن، و هم‌چنین کاهش آب‌رفتگی و نفوذپذیری گردد. مصرف کمتر آب در آن باعث کاهش تـرک‌هـای آب‌رفتگـی و جمع‌شدگی و ترک‌های ناشی از آن می‌گـردد و بعـد از خشک شدن دارای افت می‌شود که در اجرا باید به این موارد دقت شود [11-9]. مصالح غیر استاندارد موجـود ماننـد ماسـه‌ی‌مـازاد ریختـه‌گـری، خـرده شیشـه در شیشه‌گری، و بتن‌های خردشده و پساب‌هـای صـنعتی متناسب بـا مقـررات پـروژه در مخلـوط‌هـای CLSM استفاده می‌شوند [14-12]. خواص CLSM بین خواص خاک و بتن می‌باشند. این مخلوط مشابه موادی کـه در بتن استفاده می‌شود ساخته می‌شـود و مشـابه بـتن نیـز ریخته می‌شود و در حال استفاده نیـز خواصـی مشـابه خاک را از خود نشان می‌دهد. جریان‌پذیری، خاصـیتی است که CLSM را از دیگر مواد پرکننده متمایز می‌کند و ماده را قادر می‌سازد که خودبه‌خود هموار گردد، بـه داخل یک حفره برود و آنجا را پر کند و بدون نیاز بـه تجهیزات سنتی ریخـتن بـتن و تـراکم، متـراکم گـردد. میزان آب مصرفی مورد نیـاز بـرای ایـن نـوع بـتن بـه پارامترهای مختلفی ماننـد نـوع و میـزان سـنگدانه‌هـا، نسبت آب به سیمان، مواد افزودنی و خاکسـتر بـادی و دانه‌های نرم غیر چسبنده تا حدود ۲۰٪ وزن کل دانه‌ها و غیره بستگی دارد [15]. ماسـه‌هـای اسـتفاده شـده‌ی کوره‌های ریخته‌گری فلزی و غیر فلزی پتانسیل خـوبی برای اضافه شدن به بتن CLSM و اصلاح خـواص آن دارند [16]. در سال‌های اخیر تحقیقـات قابـل تـوجهی برای استفاده از ضایعات صنعتی و غیـره در سـاخت و به‌کارگیری بتن‌های کم مقاومت و بـه‌صـورت خـاکریز روان با خصوصیتی جدید انجام شده اسـت تـا ضـمن اقتصادی بـودن، باعـث بهبـود خـواص CLSM بـرای کاربردهـای جدیـد باشـد و در مـواردی مـی‌تـوان از سرباره‌ی مانـده در فیلترهـای کارخانجـات سـیمان تـا حدود ۱۵ درصد برای بهبود خـواص بـتن CLSM بـه خصوص جریان‌پذیری و مقاومت استفاده و جـایگزین سـیمان اصـلی نمـود[17,18]. اخیـراً تحقیقـاتی در خصوص استفاده از پسماندهای کارخانجات سـنگبری

در ساخت بتن‌های روان توسط آقـای دکتـر کاشـی در انستیتوی مصالح ساختمانی دانشگاه تهران انجـام شـده است.

نشست همراه با کاهش حجـم CLSM بـه‌محـض آزاد کردن آب یا هوای محبوس از طریق متراکم کـردن مخلوط مـی‌باشـد. آب مصـرفی بـرای جریـان‌پـذیری معمولاً بـیش‌تـر از آب مـورد نیـاز بـرای هیدراسـیون می‌باشد و معمولاً به‌وسـیله‌ی خـاک اطـراف کانـال‌هـا جذب می‌گـردد و یـا از طریـق سـطح بـه‌صـورت آب انداختن آزاد می‌گردد. خاکریزهای متـراکم شـده حتـی وقتی شرایط تحکیم را مراعات کنند نشسـت مـی‌کننـد ولی CLSM بعد از سخت شدن هـیچ نشسـتی نـدارد. CLSM با مصالح پلی‌اتیلن که عموماً به‌عنـوان محـافظ برای وسایل زیر خاکی و یا لوله‌های گاز یا آب استفاده می‌شوند سازگار است. برای هر نوع ماده‌ی پرکننده یـا خاکریز، دقت لازم باید مبـذول داشـت تـا آسـیبی بـه روکش محافظ خطوط لولـه‌هـای مـدفون وارد نشـود. دانه‌بندی ریزدانـه CLSMهـا مـی‌توانـد باعـث تقلیـل خراشیدن و ضربه زدن به این سطوح پلی‌اتیلنـی شـود. مخلوط‌های بتنی خـاکریز روان بـرای پرکـردن فضـای خالی زیر و اطراف و بالای لولـه‌هـای گـاز یـا آب یـا فاضـلاب نصـب شـده‌ی درون یـا بـرون شـهری در کانال‌های حفاری شده قابل استفاده مـی‌باشـند. ضـمن جلوگیری از نشست و احتمال خمیدگی در لوله‌هـا، از دسترسی و آسیب‌هـای احتمـالی لولـه‌هـای پلـی‌اتـیلن توسـط حشـرات مـوذی جلـوگیری مـی‌کنـد. تـاکنون آزمایش‌هـای متعـددی انجـام گرفتـه اسـت تـا ضـمن به‌دست آوردن طرح اختلاط‌های مختلفی برای تولید و اجرای بتن CLSM، آزمـایش‌هـای متعـدد سـازه‌ای بـر روی کانال‌های حفاری شده‌ای که لوله‌های پلی‌اتیلن در آن قرار دارد و با این بتن‌ها پر شده‌اسـت انجـام شـود. پارامترهای آزمایشگاهی زیادی برای کاربرد این بتن در این مورد خاص مورد بررسی قرار گرفته‌اند که مراحـل طراحی و ساخت آزمونه‌های مکعبی استاندارد فشـاری ۱۵۰ میلی‌متری و کانال‌هـای بتنـی تحـت جـک‌هـا بـا ظرفیت بالا با میزان بازشدگی مناسب در این مقاله ارائه می‌گردد.

آزمونه‌های آزمایشگاهی

مصالح مصرفی. خاکسـتر بـادی (وارداتـی از کشـور آفریقای جنوبی)، میکروسیلیس (کارخانه‌ی فروسـیلیس سمنان) به‌عنوان مواد مکمل به‌همراه سیمان پرتلند تیپ ۲ و خرده آجر (به‌صورت اشباع بـا سـطح خشـک) بـا دانه‌بندی بین ۱۲/۵ تا ۲۰ میلی‌متر، آب، و ماسه یا شـن برای ساخت انواع طرح اختلاط مخلـوط بتنـی خـاص کم‌مقاومت روان به‌کار رفت تا چند طرح اختلاط بهینه برای پرکردن کانال‌های لوله‌ها به‌دسـت آیـد .خاکسـتر بـادی در کشـورهایی ماننـد آفریقـای جنـوبی و در نیروگاه‌های ذغال سنگی با قیمـت بسـیار پـائین تولیـد می‌شود و برای مصرف احجام زیاد در ایـران، حمـل و نقل پرهزینه‌ای دارد. ضمناً منشـأ طبیعـی ایـن مـواد در کشـور ایـران یافـت شـده اسـت کـه بـه‌زودی قابـل بهره‌برداری با قیمت مناسـب خواهـد بـود. اسـتفاده از خرده آجـر در بسـیاری از کارخانجـات و پـروژه‌هـای عمرانی، کمکی به حفظ محیط زیست مـی‌باشـد. البتـه امکان استفاده از پودر سنگ بـه‌عنـوان بخشـی از مـواد جایگزین خاکستر بادی جهت افزایش روانی بـا اثـرات مثبت و منفی نیز وجـود دارد کـه در ایـن طـرح مـورد بررسی قرار نگرفته است.

مشخصات طرح‌های اختلاط آزمونه‌های مکعبی

۶۰ آزمونه‌ی مکعبی ۱۵ سانتی‌متری در چهار نوع طرح اختلاط D1 تـا D4 بـا خصوصـیات جریـان اسـلامپ مناسـب و بسـیار روان مطـابق بـا اسـتاندارد BS 1881-83 ساخته شـدند و در قالـب‌هـای مکعبـی ریخته و در دو حالت متفاوت عمل‌آوری گردد تا تأثیر عمل‌آوری بر بتن‌های کم‌مقاوم حـاوی خاکسـتر بـادی بررسی گردد. مقادیر آب، سیمان، ماسه و خاکستر بادی و هم‌چنین نسبت‌های آب به سـیمان و نسـبت آب بـه مجمـوع سـیمان و خاکسـتر بـادی و هـم‌چنـین وزن

مخصوص برای یک متر مکعب در جدول شماره‌ی (۱) ارائه شده است.

در آزمایش‌های مرحله‌ی بعد نیز مخلوط‌هایی برای شرایط خاص با استفاده از ترکیب خاکستر بادی و میکروسیلیس و متناسب با نیاز مقاوتی مورد نیاز، با و بدون استفاده از خرده آجر، چهار نوع طرح اختلاط DC1 تا DC4 برای یک متر مکعب مطابق جدول (۲) ساخته شدند و مورد آزمایش قرار گرفتند تا در پر کردن کانال‌های واقعی استفاده شوند. در بعضی موارد نیاز به مقاومت بالا نیست و بتن بسیار روان با مصرف کم سیمان و مصرف بالای خاکستر بادی تولید می‌شود ولی در مواردی علاوه بر بتن روان به مقاومت مناسب نیز به‌دلیل تردد سنگین نیاز است که مصرف بالاتر سیمان یا میکروسیلیس باید مدنظر باشد که در هر دو حالت استفاده یا عدم استفاده از خرده آجر می‌تواند هم نقش مقاومتی و هم مزیت اقتصادی به‌عنوان مصالح بازیافتی جایگزین سنگدانه‌های معمولی گردند. چنانچه از خرده آجر خشک استفاده شود باید آب را به میزان درصد جذب در حدود ۲۵ تا ۳۰ درصد، آب اضافه کرد تا کارایی و روانی مناسب برای تولید بتن روان حاصل گردد.

جدول ۱ طرح اختلاط بتن روان آزمونه‌های مکعبی ۱۵۰ میلی‌متری

مؤلفه‌های بتن	**مخلوط D1**	**مخلوط D2**	**مخلوط D3**	**مخلوط D4**
سیمان (کیلوگرم)	۲۲۰	۱۱۰	۱۱۰	۷۵
خاکستر بادی (کیلوگرم)	۰	۱۱۰	۲۲۰	۲۲۵
ماسه (کیلوگرم)	۱۳۳۰	۱۳۳۰	۱۳۳۰	۱۳۳۰
آب (کیلوگرم)	۲۲۰	۲۲۰	۳۳۰	۳۰۰
وزن مخصوص ($\frac{kg}{m^3}$)	۱۷۷۰	۱۷۷۰	۱۹۹۰	۱۹۳۰
$\frac{W}{C}$	۱	۲	۳	٤
$\frac{W}{C+F}$	۱	۱	۱	۱

جدول ۲ طرح‌های اختلاط مخلوط بتنی ساخته شده برای پرکردن کانال‌های حفاری شده

اجزاء تشکیل دهنده بتن	**مخلوط DC1**	**مخلوط DC2**	**مخلوط DC3**	**مخلوط DC4**
سیمان (کیلوگرم)	۵۸	۵۰	۱۲۰	۱۱۰
خاکستر بادی (کیلوگرم)	۱۱۷	۱۰۰	۱۲۰	۲۲۰
میکروسیلیس (کیلوگرم)	۰	۱۳	۰	۰
آب مصرفی (کیلوگرم)	۱۷۵	۱۵۰	۲٤۰	۲۷۵
$\frac{W}{C}$	۳	۳	۲	۲/۵
$\frac{W}{C+F}$	۱	۱	۱	۰/۸
ماسه (کیلوگرم)	۷۰۰	۷۰۰	۱٤۸۰	۱۳۲۰
خرده آجر اشباع (کیلوگرم)	۹۰۰	۹۰۰	۰	۰
وزن مخصوص ($\frac{kg}{m^3}$)	۱۹۵۰	۱۹۱۳	۱۹٦۰	۱۹۲۵

قالب‌های مکعبی آزمایشگاهی با مخلوط روان بدون نیاز به ویبره، پر می‌شوند و ملاک روانی نیز محاسبه‌ی قطر بتن پخش شده‌ی یکنواخت در آزمایش جریان اسلامپ مطابق ASTM C143- 90 و شکل (۱) بود که در حقیقت یکی از آزمایش‌های بتن خود متراکم (SCC) است که برای بتن‌های CLSM هم کاربرد دارد. اگرچه از سوزن ویکات برای اندازه‌گیری زمان گیرش ملات بتنی استفاده نشده است ولی با مشاهده در محل، زمان گیرش اولیه‌ی بتن در فضای داخل آزمایشگاه حدود ۹۰ دقیقه و زمان گیرش نهایی بسته به نوع مواد بین ٦ تا ۹ ساعت متغیر بود. آزمونه‌ها بعد از مدت زمان مورد نظر تحت آزمایش مقاومت فشاری قرار می‌گیرند. از محاسن بتن‌هایی با مقاومت فشاری پائین، امکان حفاری مجدد بعد از مدت‌ها و هم‌چنین قابلیت میخ‌کوبی برای کارهای خاص می‌باشد که در این پروژه بررسی گردید.

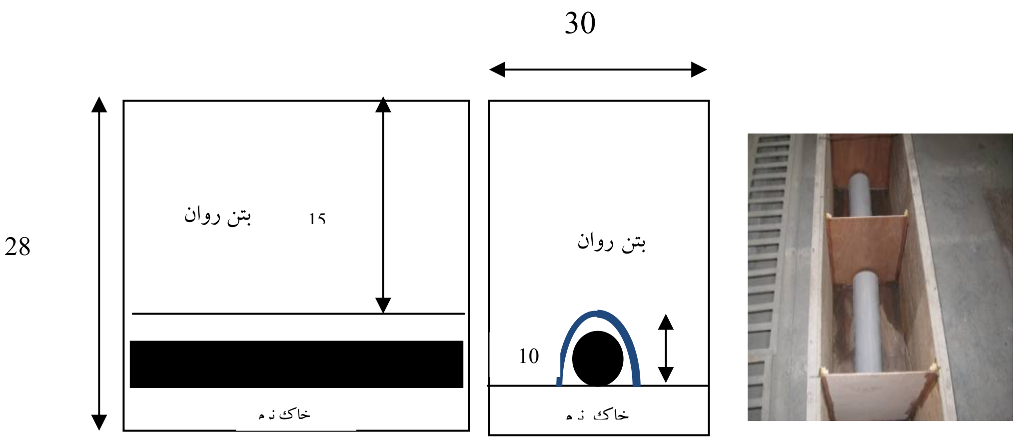
مشخصات آزمونه‌های قالب‌های کانال‌مانند سازه‌ای آزمایشگاهی

شش قالب مشابه کانال در آزمایشگاه و شش کانال مورد نظر با ابعاد و شرایط مشابه نیز در خیابان‌ها در نظر گرفته شده‌اند. همه‌ی قالب‌ها دارای ابعادی به طول ٤۰ سانتی‌متر و عرض ۳۰ سانتی‌متر چهار قالب دارای عمق ۲۸ و دو قالب دارای عمق ۳۸ سانتی‌متر بودند. بدنه‌های این قالب‌های چوبی نسبتاً محکم و سخت است و نسبتاً شبیه بدنه‌های اطراف کانال‌های طبیعی خاکی می‌باشد. این قالب‌ها از A تا F نام گذاری شده‌اند که مجموعاً چهار نوع مخلوط در داخل آن‌ها قرار می‌گیرد.

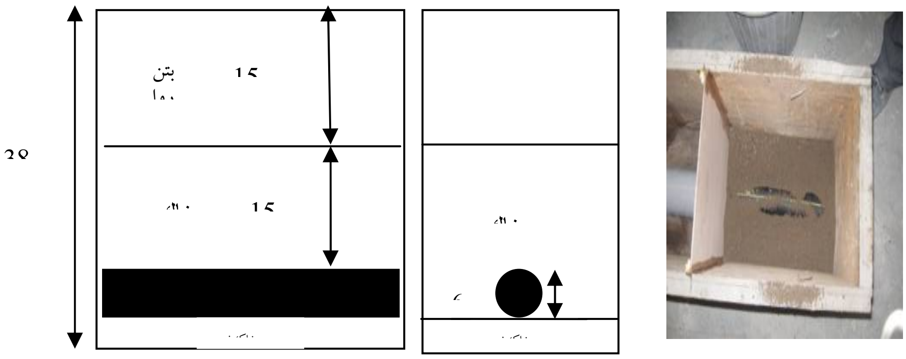
قالب‌های A و E با مخلوط DC1، قالب‌های C و F با مخلوط DC3، قالب B با مخلوط DC2، قالب D با مخلوط DC4 پر شده‌اند. در بسیاری موارد می‌توان لوله‌ی فلزی یا پلی‌اتیلن در قالب قرار داد و بتن بر روی آن ریخت اما در مواردی مانند لوله‌های گاز باید طوری باشد که مشکلی برای کنترل کیفیت جوش‌های لوله‌های پلی‌اتیلن بعد از عبور گاز داخل آن‌ها به‌وجود نیاید، لذا دو نوع بتن‌ریزی در قالب‌ها در نظر گرفته شدند. در حالت اول، یک غلاف پلیکای سبک مطابق شکل (۲-الف) در اطراف لوله‌ی اصلی گاز قرار گرفت و سپس بتن روان بر روی این غلاف‌ها ریخته شد که در نتیجه هیچ تماسی بین بتن و لوله‌ی اصلی وجود نداشت و در حالت دوم، بر روی لوله‌ی اصلی تا عمق مشخصی مطابق شکل (۲-ب)، خاک ریخته شد و به‌طور مناسب کوبیده شد. سپس یک لایه بتن روان بر روی لایه‌ی خاک کوبیده شده ریخته شد که هیچ تماسی بین بتن و لوله‌ی اصلی وجود نداشت. در همه‌ی قالب‌ها، ابتدا به‌اندازه‌ی ۲ سانتی‌متر خاک نرمه ریخته شد و لوله روی آن قرار گرفت. در چهار قالبA، B، C و D شکل (۲-الف) با عمق کل ۲۸ سانتی‌متر، ابتدا غلافی نیم‌دایره‌ای به قطر ۱۰ سانتی‌متر بر روی لوله اصلی پلی اتیلن به قطر ٦ سانتی‌متر قرار داده شد تا بتن با لوله اصلی در تماس نباشد سپس بتن با عمق ۱۵ سانتی‌متر مستقیماً بر بالای غلاف پلیکایی و هم‌چنین در اطراف آن ریخته شد. در دو قالب E و F شکل (۲-ب) با عمق کل ۳۸ سانتی‌متر، ابتدا لوله بر روی خاک نرمه با ضخامت ۲ سانتی‌متر قرار گرفت و سپس لایه‌ی خاک مخلوط ریزدانه با عمق حدود ۱۵ سانتی‌متر در بالای لوله‌ی اصلی و اطراف آن ریخته و به‌صورت دستی کوبیده شد و سپس با لایه‌ی مخلوط بتن روان با عمق حدود ۱۵ سانتی‌متر به‌طور کامل پر گردید.



شکل ۱ آزمایش جریان اسلامپ و اندازه‌گیری میزان روانی مخلوط



الف- حالت اول – غلاف‌ها بر روی لوله‌ی اصلی



ب- حالت دوم – لوله‌ی اصلی و لایه خاک کوبیده شده روی آن

شکل ۲ مقطع لوله‌های داخل کانال‌های آزمایشگاهی



شکل ۳ کلیه قالب‌های پر شده

شش قالب داخل آزمایشگاه و شش کانال حفـاری شده در خیابان آسفالتی با چهار نوع طرح اخـتلاط کـه تقریباً همه دارای خصوصیات اسلامپ ریزشی بـیش از حد متعارف در بتن‌های معمولی بودند مطابق شکل (۳) بـــه‌راحتـــی پـــر شـــدند و ۱٦ آزمونـــه‌ی مکعـــب ۱۵ سانتی‌متری نیز برای اندازه‌گیری مقاومت تهیه شدند.

مشخصات آزمونه‌های کانال‌های حفاری شده سازه‌ای خیابانی

شش کانال مورد نظر در خیابان‌ها (از A تـا F) نیـز بـا ابعاد و شرایط مشابه شش قالـب داخـل آزمایشـگاه در نظر گرفته شدند و به‌طور مجزا با بدنه‌های کاملاً طبیعی خاکی حفر گردیدند و لوله‌ها به دو صورت با و بـدون غلاف قرار گرفتند و با چهار نوع طرح اختلاط DC1 تا DC4 پر شدند. نمای جزیی و کلی هر چهار کانـال A، B، C، و D با عمق کل ۲۸ سانتی‌متر و دو کانال E و F با عمق کل ۳۸ سانتی‌متر، قبل از بتن‌ریزی در شکل (٤) نشان داده شده‌اند.

مراحل بارگذاری کانال‌های داخل آزمایشگاه

کانال‌ها باید تحت شرایط بارگـذاری بسـیار مشـابه بـه عبور کامیون ۱۰ چرخ ٤۵ تنی به‌عنوان سنگین‌ترین بار بر روی چرخ‌ها طبق آئین‌نامه‌ها، در نظر گرفته شود. در این شرایط بار متمرکز مجاز در زیر هر چرخ بین ۳ تـا ٤/۵ تن متغیر اسـت. عـرض چـرخ طبـق آیـین‌نامـه‌ی بارگذاری جاده‌ها و پل‌ها برابر ۱۰ سانتی‌متر و طول آن حدود ۲۰ سانتی‌متر می‌باشد. برای شبیه‌سازی بـار وارد بر کانال‌ها مشابه لاستیک کـامیون، تکیـه گـاهی فلـزی مشابه شکل (۵) با ابعاد ۱۰ سانتی‌متر عـرض و حـدود ۱۹ سانتی‌متر طول ساخته شد تا بار سنگین از طریق آن به کانـال منتقـل گـردد و از تمرکـز بـار بـر روی بـتن جلوگیری شود. کانال‌هـا در زیـر جـک فشـاری قـرار می‌گیرند و بارسنج مطابق شکل (٦) بـر روی آن قـرار داده می‌شود تا بار وارد را اندازه‌گیری کند. ضمناً کمـی خاک در زیر قالـب چـوبی شـبیه‌سـازی شـده ریختـه می‌شود تا شبیه کف کانال طبیعی خاکی باشـد و دارای کف فلزی سخت مشابه کف آزمایشگاه نباشـد. مطـابق شکل (۷)، از دو نوع تغییر مکان‌سنج برای اندازه‌گیـری تغییر مکان‌های قائم بر روی سطح بتن و هم‌چنـین بـر روی کف کانال چوبی استفاده شده‌اند.



شکل ٤ آماده کردن کلیه‌ی کانال‌های خیابانی



شکل ۵ تکیه‌گاه فلزی منتقل‌کننده‌ی بار



شکل ٦ نصب جک و بارسنج و ریختن خاک در زیر قالب



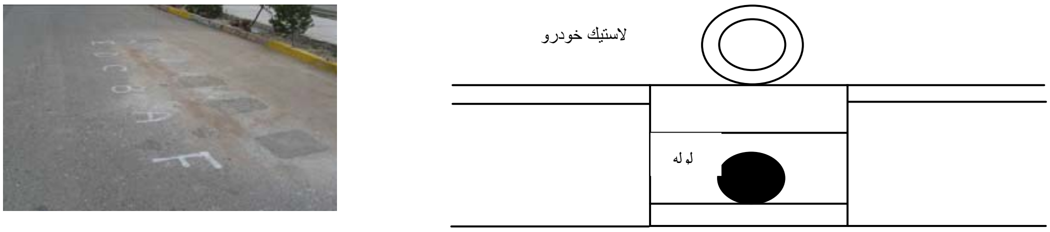
شکل ۷ نصب تغییر مکان سنج برای اندازه‌گیری
تغییر مکان‌های قایم قالب‌ها

مراحل بارگذاری و تردد خودروها بر روی کانال‌های خیابان

کانال‌های خیابان پس از سه روز ترافیک سبک خودروی سواری و پس از شش روز ترافیک سنگین کامیون‌ها و اتوبوس‌ها باز شد. شکل (۸) آماده بودن کانال‌ها پس از تکمیل بتن‌ریزی و جمع کردن موانع اطراف آن را نشان می‌دهد که آماده‌ی تردد وسایل نقلیه سبک می‌باشد. شکل (۹) تردد و عبور خودروی سبک سواری و کامیون سنگین حدود ۲۰ تن که از روی همه کانال‌ها می‌گذرند را نشان می‌دهند.

نتایج آزمایش‌ها

آزمونه‌های مکعبی. نتایج مقاومت‌های فشاری ۲۸ روزه‌ی آزمونه‌های مکعبی ۱۵ سانتی‌متری (مطابق بند ٦-۱ استاندارد ٦۰٤۸ ایران) بدون عمل‌آوری شدن (در هوای آزاد آزمایشگاه) و آزمونه‌های عمل‌آوری شده به‌صورت مرطوب و درصد افزایش مقاومت آزمونه‌های عمل‌آوری شده نسبت به عمل‌آوری نشده در جدول (۳) و نسبت مقاومت ۲۸ به ۷ روزه‌ی آزمونه‌ها نیز در جدول (٤) داده شده‌اند که a_1 مقاومت فشاری نمونه با عمل‌آوری مناسب و a_2 بدون عمل‌آوری ۲۸ روزه بوده است و $k_1 = \frac{a_1}{a_2}$ نسبت این دو عدد می‌باشد در حالی که a_3 مقاومت فشاری ۷ روزه‌ی نمونه بدون عمل‌آوری است و k_2 نسبت مقاومت‌های ۲۸ به ۷ روزه بدون عمل‌آوری می‌باشد. مقاومت این آزمونه‌ها متناسب با طرح‌های مختلف اختلاط و میزان مصرف مؤلفه‌های بتن از ٤ تا ۸۵ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع متغیر بودند که بر حسب نیاز از یکی از این طرح‌ها در مراحل بعدی استفاده گردید. زمان گیرش اولیه و نهایی آزمونه‌ها متناسب با میزان مصرف سیمان و مصرف خاکستر بادی و شرایط جوی و آب و هوایی، متغیر می‌باشد و اگر نیاز به تردد سریع افراد و به‌خصوص وسایل نقلیه می‌باشد باید با استفاده از موادی مانند میکروسیلیس سعی شود مقاومت اولیه‌ی بالاتری در زمان کوتاه‌تر به‌دست آید.



الف– مقطع شماتیک کانال خیابانی و چرخ لاستیک خودرو

ب– کانال ساخته شده آماده

شکل ۸ آماده بودن کانال‌های خیابانی برای بارگذاری



شکل ۹ تردد و عبور خودرو سبک سواری و کامیون بر روی کانال‌های خیابانی

جدول ۳ نتایج مقاومت‌های فشاری ($\frac{kg}{cm^2}$) ۲۸ روزه‌ی آزمونه‌های مخلوط‌های متفاوت با مقایسه‌ی اثر عمل‌آوری

نوع عمل‌آوری	مخلوط											
	D1			**D2**			**D3**			**D4**		
	نمونه۱	نمونه۲	متوسط	نمونه۱	نمونه۲	متوسط	نمونه۱	نمونه۲	متوسط	نمونه۱	نمونه۲	متوسط
با= a_1	۷۵/۷۶	۸۵/۸۳	۸۰/۸	۴۸/۵۷	۴۸/۸۰	۴۸/۷	۳۰/۷۰	۳۵/۹۶	۳۳/۳	۲۵/۶۷	۲۴/۱۲	۲۴/۹
بدون= a_2	۷۸/۶۷	۷۵/۵۶	۷۷/۱۱	۲۸/۶۷	۲۸/۶۷	۲۶/۷	۱۴/۷۷	۱۱/۸۴	۱۳/۳	۱۳/۶۹	۱۵/۰۱	۱۴/۳۵
$k_1=\frac{a_1}{a_2}$	۰/۹۶	۱/۱۴	۱/۰۵	۱/۸۳	۱/۸۳	۱/۸۳	۲/۰۸	۳/۰۴	۲/۵	۱/۸۷	۱/۶	۱/۷۳

جدول ۴ نتایج مقاومت فشاری ($\frac{kg}{cm^2}$) آزمونه‌ها بدون عمل‌آوری مخلوط‌های متفاوت با مقایسه‌ی عمر آزمونه‌ها

مدت زمان (روز)	مخلوط											
	D1			**D2**			**D3**			**D4**		
	نمونه۱	نمونه ۲	متوسط	نمونه ۱	نمونه[۲	متوسط	نمونه ۱	نمونه ۲	متوسط	نمونه ۱	نمونه ۲	متوسط
a_2 =۲۸	۷۸/۶۷	۷۵/۵۶	۷۷/۱۱	۲۸/۶۷	۲۸/۶۷	۲۶/۷	۱۴/۷۷	۱۱/۸۴	۱۳/۳	۱۳/۶۹	۱۵/۰۱	۱۴/۳۵
a_3 =۷	۶۷/۱۱	۶۴/۴۷	۶۵/۷۹	۱۹/۳	۱۸/۹	۱۹/۱۴	۸/۲	۷/۶	۷/۹	۲۳/۷	۲۴/۷	۲۴/۲
$k_2=\frac{a_2}{a_3}$	۱/۱۷	۱/۱۷	۱/۱۷	۱/۳۸	۱/۴	۱/۳۹	۱/۸	۱/۶	۱/۷	۲/۷	۲/۴	۲/۵۵

جدول ۵ نتایج مقاومت‌های ۹۰ روزه‌ی (سه ماهه) آزمونه‌های مکعبی ۱۵ سانتی‌متری بدون عمل‌آوری شدن

طرح اختلاط	مقاومت فشاری ۷ روزه $\frac{kg}{cm^2}$	مقاومت فشاری ۹۰ روزه $\frac{kg}{cm^2}$	نسبت مقاومت ۹۰ به ۷ روزه
DC1	۷/۵	۱۳/۵	۱/۸
DC2	۸/۵	۱۵/۵	۱/۸۲
DC3	۱۸/۵	۳۷/۷	۲
DC4	۲۱	٤۳/۵	۲/۱

برای حصول مقاومت کوتاه‌مدت و بـه نیـت بهـره برداری سریع از کانال بتن‌ریزی شده و اجـازه‌ی تـردد، آزمونه‌های کانال‌های ساخته شده در خیابان، بعد از سه روز در معـرض تـردد خودروهـا قـرار گرفتنـد و در حقیقت آزمایش مقاومت فشاری بـر روی آن‌هـا انجـام شد. مقاومت فشاری متوسط ۷ و ۹۰ روزه‌ی آزمونـه‌ی مکعبی بتنی (با سیمان پرتلند تیپ ۲) طرح‌های اختلاط DC1 تا DC4 در جدول (۵) نشان داده شده‌انـد. نتـایج سـه ماهـه رشـدی حـدود ۱۰۰٪ در مقاومـت فشـاری آزمونه‌های بتنی نسبت به مقاومـت فشـاری متوسـط ۷ روزه را نشان داد که به‌طور افزایشی قابل توجه اسـت. باید توجه کـرد کـه کلیـه‌ی آزمونـه‌هـا در فضـای بـاز آزمایشگاه و بدون هـر گونـه عمـل‌آوری خـاص نگـه داشته شده‌اند. بنابراین بر خلاف بتن‌های معمـولی کـه عدم عمل‌آوری مناسب باعث جلوگیری از افزایش قابل توجه در مقاومت فشاری مـی‌شـود، بـتن‌هـای حـاوی خاکستر بادی با عمل‌آوری کم‌تر یا ناچیز هم می‌تواننـد افزایش مقاومت فشاری داشته باشند. قطر بتن ریزشـی در آزمایش اسلامپ به‌عنوان معیاری برای روانی نسـبی بتن ساخته شده می‌باشد. قطر متوسط بـتن ریزشـی در آزمایش‌ها طرح اختلاط یک، دو، سه و چهار بـه‌ترتیـب برابر ٦۱، ٥٤، ۷۸ و ٦۹ سانتی‌متر و همگی بـه‌صـورت ریزشی بود.

مشاهدات و نتایج سازه‌ای کانال‌های آزمایشگاهی

مراحل مختلف بارگذاری توسط جک‌های فشاری پس از ١٤ روز بعد از بتن ریزی و شکست تدریجی سـطح بتن و نشست در کانـال‌هـای مختلـف در شـکل (۱۰) نشان داده شده‌اند. در کانال‌های A و B با مخلوط‌هـای DC1 و DC2 دارای خرده آجر، بتن مسـتقیماً بـر روی غلاف پلیکا ریخته شد و به‌دلیل عدم وجـود خـاک بـر روی لوله‌ها و زیر بتن ریخته شده، میزان نشست نهایی بسیار ناچیز بود. کانال‌های A و B به‌ترتیب بارهای ۳/۷ و ۳/۸۵ تن را تحمل کردند که در حدود بـار نهـایی از طرف چرخ کامیون می‌باشد. ترک‌ها به‌صورت شـعاعی در اطراف صفحه‌ی فلزی که مشابه چرخ لاستیک است اتفاق افتاد. کانال B بـا مخلـوط DC2 دارای درصـدی میکروسیلیس بود که باعـث افـزایش نسـبی و مصـرف کم‌تر سیمان شد.

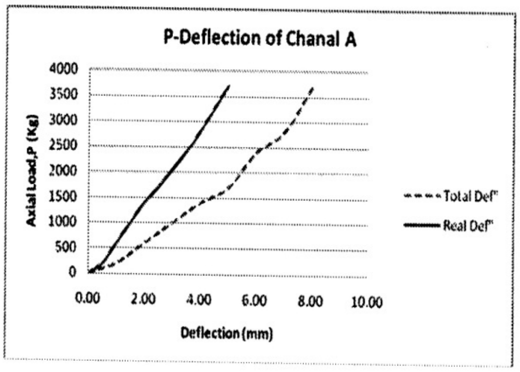
در قالب‌هـای C و D بـا مخلـوط‌هـای روان‌تـر و نرم‌تر DC3 و DC4 (بدون خرده آجـر)، بـتن مسـتقیماً بر روی غـلاف‌هـای پلیکـا ریختـه شـد و تماسـی بـا لوله‌های اصلی پلی اتیلن نداشت و میزان نشست نهایی در هر دو قالب بسیار ناچیز بود و به‌ترتیب باری معادل ٦ و ۵ تن، تقریباً دو و یک و نـیم برابـر بـار مـاکزیمم مجاز کامیون‌های سـنگین در جـاده‌هـا تحمـل کـرد و ترک‌ها هم به‌صورت شعاعی در اطراف صفحه‌ی فلزی تا شکست نهایی ادامه یافت و رفتار مناسب‌تری نسبت به قالب‌های دارای خـرده آجـر نشـان داد. در قالـب E به‌دلیل خاک روی لوله‌ها و زیر بتن، نشست اولیه حائز توجه بود ولی نشست نهایی بعد از تراکم خاک، بسـیار ناچیز بود. با داشتن مخلوط DC1 و مقدار قابـل توجـه خرده آجر و باری معادل ۳/۵ تن مشابه کانال‌های A با مخلوط مشابه و کانال B با مخلوط DC2، بار در قالـب

B به‌دلیل استفاده از میکروسیلیس حدود ۱۲٪ بیشتر بود. در قالب F با مخلوط DC3 و بدون استفاده از خرده آجر، خاک کوبیده بین لوله‌ی اصلی پلی‌اتیلن و بتن روان قرار گرفت لذا نشست اولیه‌ای ناشی از تراکم خاک مشاهده شد ولی نشست نهایی آن ناچیز بود و باری برابر ۷/۵ تن معادل دو برابر بار بیشینه‌ی مجاز کامیون‌های سنگین در جاده‌ها، قبل از خرابی نهایی را تحمل کرد. تنش در هر مرحله بر روی بتن قالب‌ها برابر بار وارد در آن مرحله تقسیم بر مساحت تکیه‌گاه فلزی (۱۹۰ سانتی‌متر مربع) می‌باشد. اختلاف بین تغییر مکان قائم کل (Total Displacement) زیر بار وارد و تغییر مکان قائم کف قالب چوبی ناشی از تراکم خاک برابر با تغییر مکان واقعی (Real Displacement) بتن در زیر بار وارده خواهد شد. نتایج اولیه‌ای که از آزمایش‌ها به‌دست آمد شامل مقدار بار P و تغییرمکان‌های کل در سطح بتن (در مجاورت صفحه‌ی فولادی) و تغییرمکان بر روی کف چوبی قالب بودند لذا منحنی‌های بار- تغییر مکان کل و بار- تغییرمکان واقعی و تنش – کرنش بتن داخل قالب ترسیم گردید که کرنش حاصل تقسیم تغییر مکان واقعی سطح بتن بر ارتفاع بلوک و قالب بتنی (ارتفاع متوسط) می‌باشد. آزمونه‌ای از منحنی بار فشاری – تغییر مکان کانال‌های A و E در شکل (۱۱) نشان داده شده است که تغییر مکان کل قرائت شده توسط یکی از تغییر مکان سنج‌ها را و هم‌چنین اختلاف قرائت تغییر مکان‌سنج دوم و اول را به‌عنوان تغییر مکان واقعی نشان می‌دهد. کرنش نهایی محاسبه شده که بر اساس تغییر مکان واقعی بتن و ارتفاع متوسط بتن‌ریزی در نظر گرفته شده است برابر ۲ درصد و تنش نهایی برابر با ۱۹/۹۵ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع می‌باشد.

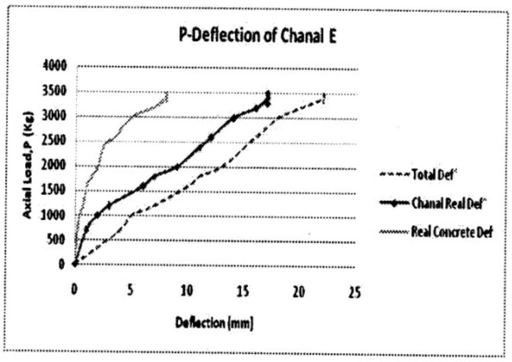
قالب‌های آزمایشگاهی متناسب با نوع بتن مصرفی و وجود یا عدم وجود خرده آجر و یا میکروسیلیس و خاکستر بادی دارای نشست و باربری متفاوت بودند. قالب B به دلیل مخلوط سخت‌تر حاوی خرده آجر و میکروسیلیس، دارای نشست نهایی کم‌تر ولی باربری بیش‌تر نسبت به قالب A بود. قالب E با نسبت آب به سیمان بالا و مقدار قابل توجه خرده آجر و یک لایه خاک کوبیده شده، رفتاری مشابه قالب A با بار نهایی حدود ۹۰٪ بار نهایی کانال B داشت. قالب F دارای مخلوطی مشابه کانال C ولی دارای یک لایه خاک کوبیده شده بر روی لوله‌ها و زیر بتن بود، از این رو، نشست اولیه‌ای قابل توجه داشت ولی میزان نشست نهایی آن بسیار ناچیز بود و بار نهایی آن به ترتیب ۲۵٪ و ۵۰٪ بیش از بار تحمل شده‌ی قالب‌های C و D بود. نشست قابل توجه در این قالب به‌دلیل نوع بتن نرم و انعطاف پذیری بود که دارای درشت دانه و خرده آجر نبود و در کنار مقاومت فشاری قابل توجه، دارای تغییر مکان قائم قابل توجه هم بود. منحنی‌های تنش ـ کرنش بتن شش قالب در شکل (۱۲) نشان داده شده‌اند.



شکل ۱۰ مراحل بارگذاری تدریجی و شکست نهایی قالب کانالی B با ترک‌های شعاع

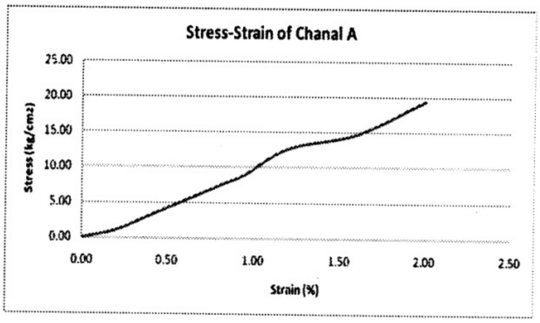


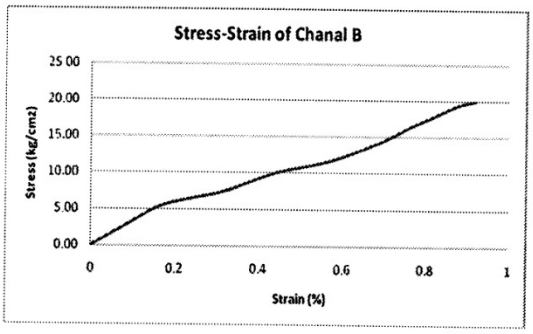
الف – قالب A



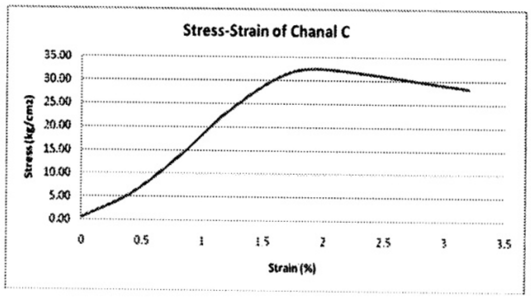
ب– قالب E

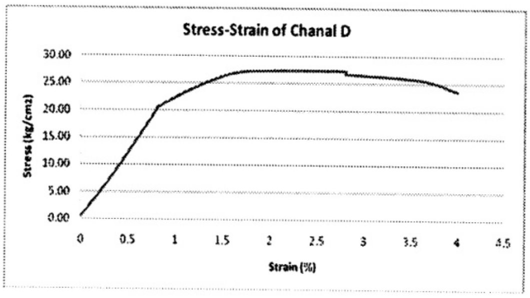
شکل ۱۱ منحنی‌های نیرو – تغییر مکان‌های کل و واقعی بتن قالب‌ها



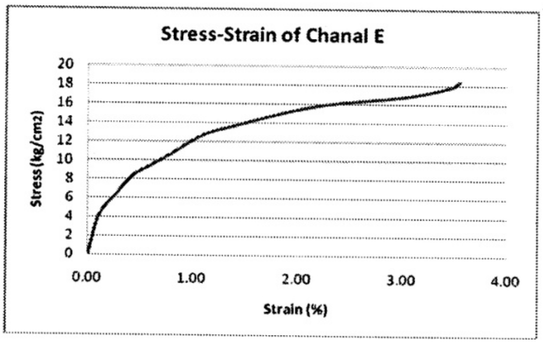


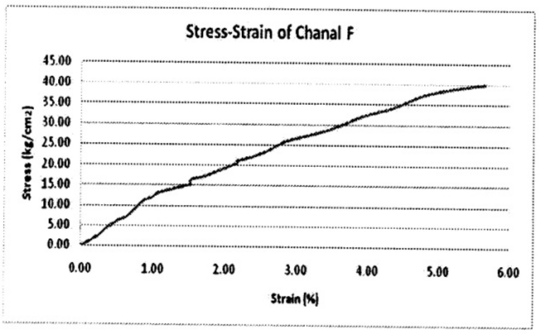
B ب – قالب Aالف – قالب





D د – قالب Cج – قالب





F و – قالب Eه – قالب

شکل ۱۲ منحنی‌های تنش – کرنش بتن در قالب‌ها

نتایج سازه‌ای کانال‌های خیابانی

کانال‌های خیابانی پس از بتن‌ریزی و جمع‌آوری موانع پس از حدود سه روز در معرض عبور و مرور وسایل نقلیه‌ی سبک و بعد از حدود ۵ روز در معرض وسایل نقلیه سنگین مانند اتوبوس و کامیون باز شدند و وضعیت ظاهری سطح کانال‌ها به‌طور متوسط هر هفته به‌طور دقیق بررسی شد. شرایط اطراف کانال‌های خیابانی به‌دلیل طبیعی و سخت‌تر بودن، مناسب‌تر از شرایط کانال‌های آزمایشگاهی بودند لذا انتظار رفتار بهه‌تری از این کانال‌های خیابانی نسبت به کانال‌های آزمایشگاهی بوده است لذا اثر نشست یا ترک یا آسیب دیگری مشاهده نشد و این کانال‌ها توانستند بار متمرکزی بین ۳۵۰۰ تا حدود ۷۰۰۰ کیلوگرم (مشابه بار انتقالی از چرخ خودروهای سبک و سنگین) را تحمل کنند. بتن‌های حاوی خاکستر بادی حتی بدون عمل‌آوری ویژه و بعد از حدود سه ماه، بیش از ۸۰٪ افزایش مقاومت از خود نشان دادند لذا دارای محاسنی نسبت به آسفالت به‌خصوص در لکه‌گیری می‌باشند. نشست کانال‌های خیابانی پس از حدود سه ماه پس از بتن‌ریزی و تردد خودروهای سبک و سنگین مطابق شکل (۱۳) اندازه‌گیری شدند که نشان داد که ظاهر کانال‌های خیابانی، قبل از بارگذاری و بعد از تردد خودروها کاملاً مشابه بودند.

کانال‌های A و B و E دارای مخلوط‌های بتنی حاوی خرده آجر و سطح اولیه‌ی زبر و خشن بودند ولی کانال‌های C و D و F دارای مخلوط‌های بتنی حاوی خاکستر بادی و بدون خرده آجر به‌صورت نرم و با سطحی صیقلی و صاف بودند لذا سایش سطحی کم‌تری داشتند. میزان نشست در کانال‌ها بسیار اندک بود، به‌طریقی که به‌صورت چشمی قابل تشخیص نبود. میزان نشست سطح بتن در کانال‌های مختلف خیابانی نسبت به سطح آسفالت مجاور اندازه‌گیری شد که میزان متوسط نشست در کانال‌های C و D و F پس از سه ماه به‌ترتیب برابر ۱/۵، ۱/۵، و ۱ میلی‌متر بود. میزان متوسط نشست مقادیر برجسته نسبت به سطح آسفالت کم‌تر از ۱/۵ میلی‌متر و میزان متوسط فرورفتگی در سطوح زبر برابر ۵ میلی‌متر بود. لذا مشاهدات رفتار کانال‌های بتنی با و بدون خرده آجر تحت تردد خودروها نشان داد که این کانال‌ها می‌توانند متناسب با نیاز مقاومتی و کیفیت سطح روکش راه، در خیابان‌های اصلی یا فرعی و یا شهری و روستایی استفاده گردند.

تجزیه و تحلیل نتایج

پارامترهای مختلفی برای بررسی نتایج حاصل مدنظر بودند که عبارتند از عمل‌آوری مرطوب یا عدم عمل‌آوری، عمر آزمونه‌ها، میزان نسبت $\frac{W}{C}$ میزان مصرف خاکستر بادی برای افزایش کارایی در قالب نسبت $\frac{W}{C+F}$ و تعداد آزمونه‌ها برای هر مخلوط. در پایان اثر پارامترهای مختلف مقایسه شدند.




شکل ۱۳ ابزار و روش اندازه‌گیری نشست کانال‌های خیابانی پس از سه ماه

از بررسی نتایج مقاومت‌های فشاری آزمونه‌های هر مخلوط برای یک حالت خاص مشاهده می‌گردد که اختلاف متوسط مقاومت‌ها و مقاومت تک تک آزمونه‌ها بسیار ناچیز است و نتیجه می‌شود که تعداد دو آزمونه تقریباً مناسب می‌باشد. نتایج نشان دادند که مقاومت آزمونه‌های دارای سیمان نسبتاً کم بود و بدون خاکستر بادی، اختلاف ناچیزی در حالت عمل‌آوری شده و نشده داشت ولی این اختلاف در نمونه‌های دارای خاکستر بادی، قابل توجه بود لذا اگر آزمونه‌های دارای خاکستر بادی به‌طور مناسب عمل‌آوری شوند، به‌طور متوسط تا ۸۰ درصد افزایش مقاومت خواهند داشت. هم‌چنین افزایش خاکستر بادی باعث افزایش روانی و کارایی ولی کاهش قابل توجه مقاومت بتن می‌شود.

نسبت مقاومت ۲۸ به ۳ و ۷ روزه‌ی آزمونه‌های بدون خاکستر بادی به ترتیب حدود ۱/٦ و ۱/۱۷ می‌باشد ولی این نسبت در آزمونه‌های حاوی خاکستر بادی حدود سه است بنابراین افزایش عمر باعث افزایش قابل توجهی در مقاومت بتن روان می‌شود . نتایج آزمایش جریان اسلامپ مخروط ناقص آزمونه‌های مکعبی ۱۵ سانتی‌متری که با بتن روان مطابق جدول (۲) از پنج نوع طرح اختلاط ساخته شدند نشان دهنده‌ی وجود اسلامپ ریزشی و قطر پخش‌شدگی قابل قبول بود و به‌راحتی ساخته و در داخل قالب‌ها ریخته شد. آزمونه‌های هر مخلوط در هوای آزاد آزمایشگاه قرار داده شدند و از هیچ روشی که برای آزمونه‌های بتن معمولی متداول است در عمل‌آوری مرطوب آزمونه‌ها استفاده نشد ولی افزایش مقاومت در خیلی از بتن‌ها مشاهده شد. از بررسی نتایج مقاومت‌های فشاری آزمونه‌های مخلوط‌ها مشاهده گردید که تعداد دو آزمونه در هر مرحله تقریباً مناسب می‌باشد و مقاومت ۲۸ روزه‌ی این آزمونه‌ها به‌طور قابل توجهی افزایش می‌یابد. بتن‌های حاوی خرده آجر تا حدود ٤۷ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع می‌توانند تحمل مقاومت فشاری داشته باشد که عدد بسیار مناسبی می‌باشد.

مقایسه‌ی نتایج تنش – کرنش کانال‌ها با مخلوط‌های مختلف در شکل (۱۲) بیانگر این است که کانال‌هایی که دارای مخلوط‌های حاوی خرده آجر بودند رفتاری نسبتاً خطی داشتند به‌خصوص در دو کانال A و B که عمق کمتری داشتند و بتن مستقیماً روی لوله‌ی مدفون ریخته شده بود. ضمن این‌که کانال B که دارای میکروسیلیس بود با ظرفیت تقریباً یکسان، تغییر مکان و کرنش کم‌تری حدود ۵۰٪ از خود نشان داد در حالی که کانال E با مخلوط مشابه بتن سفت بر روی یک لایه خاک کوبیده ریخته شد که با ظرفیت تقریباً برابر دو کانال دیگر، رفتار کمی غیر خطی همراه با کرنش بیش‌تری حدود ۵۰٪ به‌دلیل داشتن بستر منعطف‌تر از خود نشان داد که می‌تواند میزان ترک‌های احتمالی را کاهش دهد. ولی کانال‌های C و D و F که بدون خرده آجر بودند و مقادیر متفاوت خاکستر بادی داشتند رفتار متفاوتی با کانال‌های حاوی خرده آجر نشان دادند. هر سه کانال دارای رفتار غیر خطی با کرنشی بیش از ۲ تا ۳ برابر و مقاومت بالاتری بین ٤۰ تا ۱۰۰ درصد بودند. کانال حاوی خاکستر و آب بیش‌تر دارای مقاومت کم‌تری بود و کانالی که در آن بتن بر روی خاک کوبیده ریخته شده بود دارای افزایش مقاومت قابل توجه نسبت به کانال با بتن روی لوله بود که دلیل آن نرم‌تر بودن بتن حاوی خاکستر بادی و تأخیر در شکست آن بود.

مقایسه‌ی مطلق هزینه‌ی اولیه و مصالح، تنها گزینه برای شناخت اهمیت بتن‌های روان یا یک نوع خاص از طرح‌های اختلاط به‌کار رفته در این مقاله نمی‌باشد و پارامترهای مختلفی باید مدنظر باشند که نشان دهنده‌ی امکان استفاده از هر یک از طرح‌های به‌کار رفته در این پروژه‌ی تحقیقاتی باشد و هر کدام متناسب با شرایط

ویژه‌ی خود، قابل به‌کارگیری باشند. معمولاً قیمت تمام شده‌ی ساخت و حمل و در قالب ریختن و متراکم شدن یک متر مکعب بتن معمولی با وزن ۲۳۰۰ کیلوگرم و هزینه‌ی نیروی انسانی و تجهیزات و عمل‌آوری در مناطق غیر شهری بین ۷۰ تا ۸۰ هزار تومان می‌باشد. قیمت تمام شده‌ی این بتن‌ها خیلی کم‌تر از بتن‌های معمولی است زیرا وزن مخصوص تقریبی آزمونه‌های بتن روان بین ۱۸۰۰ تا ۱۹۵۰ کیلوگرم بر متر مکعب است، قیمت اولیه‌ی متوسط خاکستر بادی و میکروسیلیس زیاد نیست، خرده آجر به کار رفته در آن در زمره‌ی ضایعات می‌باشد و سیمان نیز به مقدار خیلی کم استفاده می‌شود. بتن‌های دارای خرده آجر مقاومت کم‌تری با سطح کمی زبر دارند ولی با قیمت کم‌تری نیز قابل تولید می‌باشند، در حالی که بتن‌های بدون خرده آجر و با خاکستر بادی بیش‌تر دارای روانی بسیار مناسب، سهولت ساخت و اجرا و سرعت بالای اجرایند و مقاومتی قابل قبول از خود نشان می‌دهند و با کم‌ترین عمل‌آوری دارای افزایش مقاومت نیز می‌شوند. سرعت عمل و عدم نشست از مزایای برجسته‌ی بتن‌های روان می‌باشد که به‌راحتی نمی‌توان بر آن قیمت گذاشت. رفع نشست‌های ناهمگون قابل توجه در جاده‌ها و خیابان‌ها در اثر پر کردن کانال‌ها با خاک معمولی (با فرض کوبیدن استاندارد) و کاهش احتمال نفوذ و آسیب رساندن حیوانات موذی به لوله‌های پلی‌اتیلن و هم‌چنین کاهش آسیب‌های شیمیایی انواع خاک‌ها یا آب‌های مجاور، از مزایای دیگر این نوع بتن‌ها با هزینه‌ی اولیه‌ی پائین می‌باشد. سرعت عمل و امکان بهره‌برداری سریع، پارامتر مهم دیگری است که حتماً در بعضی شرایط باید مدنظر باشد تا ترافیک به حداقل برسد و آسیب‌های روحی و روانی بر رانندگان و ساکنان اطراف محل اجرای این نوع کانال‌ها نیز تشدید نیابد.

نکته‌ی دیگر، اهمیت خط لوله و محل اجرا می‌باشد که امکان استفاده از یکی از طرح‌های پیشنهادی بالا را به‌جای اجرای سنتی خاکریزی و کوبیدن زمان‌بر با معایب بعدی در خصوص نشست و غیره فراهم می‌آورد.

نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر تجربیات ارزنده‌ای در خصوص کاربرد آزمایشگاهی مخلوط‌های کم مقاومت و به‌کار گرفتن مصالح جدید برای اهداف خاص حاصل گردید. نتایج به‌دست‌آمده اختصاراً به‌صورت زیر ارائه می‌شود:

۱- به‌دلیل محدودیت اطلاعات درباره کاربردها، خصوصیات مصالح، نسبت‌ها، ساخت و اجرا و مراحل کنترل کیفیت این بتن، اجرای پروژه تحقیقاتی آزمایشگاهی بزرگ حاضر سهمی در زمینه‌ی ساخت بتن‌های جدید داشته است.

۲- انتخاب مواد مخلوط باید براساس موجود بودن، هزینه، کاربرد خاص و خصوصیات ضروری شامل روانی و مقاومت باشد و معمولاً شامل آب، سیمان پرتلند، خاکستر بادی و دانه‌های ریز یا درشت با مواد کاملاً بازیافتی مانند خرده آجر است تا خواص معینی مانند مقاومت فشاری یا قابلیت حفاری و کم هزینه بودن به‌دست آیند.

۳- مقاومت‌های فشاری آزمونه‌های مکعب ۱۵ سانتی‌متری بسیار روان با متغیرهای خاکستر بادی، نسبت آب به سیمان، عمر آزمونه‌ها و شرایط عمل‌آوری و تعداد آزمونه‌ها، بین ٤ تا ۸۵ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع بودند. آزمونه‌هایی با عیار پایین سیمان اختلاف ناچیزی در مقاومت برای حالت عمل‌آوری شده و عمل‌آوری نشده داشتند در حالی که آزمونه‌های دارای خاکستر بادی اختلاف قابل توجه، تا ۸۰ درصد،

در مقاومت فشاری آزمونه‌های عمل‌آوری شده و عمل‌آوری نشده از خود نشان دادند.

٤- مقاومت ۲۸ روزه به ۳ و ۷ روزه در آزمونه‌های بدون خاکستر بادی در شرایط عمل‌آوری مرطوب به‌ترتیب حدود ۱/٦ و ۱/۱۷ برابر ولی در آزمونه‌های حاوی خاکستر بادی حدود سه و ۱/۵ برابر بودند.

۵- مقاومت فشاری آزمونه‌های سه ماهه نسبت به ۷ روزه، رشد حدود ۱۰۰٪ داشت بنابراین بر خلاف بتن‌های معمولی، بتن‌های حاوی خاکستر بادی در شرایط عمل‌آوری کم یا ناچیز هم می‌توانند افزایش مقاومت فشاری داشته باشند.

٦- شش قالب چوبی بزرگ در داخل آزمایشگاه و حفاری شش کانال طبیعی با ابعاد مشابه در خیابان آسفالت شده برای شبیه‌سازی رفتار بتن‌ها در کانال‌های بزرگ خیابانی با و بدون غلاف، در نظر گرفته شدند.

۷- کانال‌های دارای خرده آجر و بدون خرده آجر دارای خاکستر بادی به‌ترتیب بار متمرکزی حدود ۳/٦ و ۷ تن در آزمایشگاه تحمل کردند که به‌ترتیب در حدود دو برابر بار بیشینه‌ی مجاز کامیون‌های سنگین در جاده‌ها بودند.

۸- بیشینه تغییرمکان واقعی بتن در بار نهایی در کانال‌های آزمایشگاهی با و بدون خرده آجر حاوی خاکستر بادی بین ۲/۵ تا ۸ میلی‌متر بود که در بسیاری موارد قابل اغماض هستند.

۹- هیچ اثر تخریب یا نشست قابل توجه در کانال‌های خیابانی پس از سه روز ترافیک سبک و پس از شش روز ترافیک سنگین کامیون‌ها و اتوبوس‌ها مشاهده نشد.

۱۰- عوامل مختلفی مانند قیمت تمام شده‌ی مصالح اولیه و ساخت، هزینه اجرا و عمل‌آوری، امکان تعمیرات و حفاری‌های بعدی و هزینه‌های نگهداری، باید برای توجیه اقتصادی کاربرد بتن‌های روان خاص برای پرکردن کانال‌ها در مقایسه با روش سنتی پر کردن در نظر گرفته شوند لذا به‌طور مطلق امکان مقایسه‌ی مستقیم دو طرح با هم به‌دلیل طیف گسترده با پارامترهای مختلف وجود ندارد زیرا هر کدام برای خود محاسن یا معایب مجزایی دارند.

قدردانی

کار تحقیقاتی حاضر با حمایت مالی شرکت گاز استان سمنان و معاونت پژوهشی دانشگاه سمنان انجام شد که از آنان و هم‌چنین کلیه‌ی کارشناسان و همکاران آزمایشگاه سازه‌ی دانشگاه سمنان برای کمک در انجام آزمایش‌های متعدد بدین‌وسیله تشکر و قدردانی می‌گردد.

مراجع

1. Adaska W.S., " Controlled Low Strength Materials", SP-150, ACI ,(1999).
2. ACI Committee 229, "Controlled Low Strength Materials", ACI 229R-99 ,(1999).
3. Amster K.,Jennifer L., "The Design and Application of Controlled Low Strength Materials (Flowable Fill)", STP 1331, ASTM, Hitch ,(1998).
4. Thaha W., Lachemi, M., "Development of Controlled Low Strength Materials Using Cement Kiln Dust", MS Thesis, Dep. of Civil Eng., Ryerson University, Toronto, Canada ,(2005).
5. Green B.H. and Schmitz, D., "Development of Soil-based Controlled Low Strength Materials", MS

Thesis, Dep. of Geo-sciences, Mississippi State University, USA ,(1999).

6. Lianxiang D. and Folliard K., "Laboratory Investigations of Controlled Low-Strength Material", Ph.D Thesis, Dep. of Civil Engineering, Texas at Austin University, USA ,(2001).
7. Balasubramanyam P. and Puppala A., "Experimental Investigations on Followable Fills for Trench/Road Maintenance". MS Thesis, Dep. of Civil Eng., Texas University, USA ,(2004).
8. Hemachandar M. and Siriwardane H., "Numerical Modeling of Buried Pipes with Followable Fill as a Backfill Material". MS Thesis, College of Eng. and Mineral Resources, West Virginia University, USA ,(2005).
9. Naik T. R., Kraus R.N., Siddique R. and Chun Y.M., "Properties of Controlled Low-Strength Materials Made with Wood Fly Ash", Journal of ASTM Int., June 2004, Vol. 1, No. 6 ,(2004).
10. Horiguchi T., Fujita R. and Shimura K., "Applicability of Controlled Low-Strength Materials with Incinerated Sewage Sludge Ash and Crushed-Stone Powder", Journal of Materials in Civil Engineering, Volume 23, Issue 6 ,(2011).
11. Gabr M. A. and Bowders J.J., "Controlled low-strength material using fly ash and AMD sludge", Journal of Hazardous Materials, Vol. 76, Issues 2-3, 2000, Pages 251-263 ,(2000).
12. Katz A. and Kovler K., "Utilization of industrial by-products for the production of controlled low strength materials (CLSM)", Journal of Waste Management 24,501–512 ,(2004).
13. Tahaa R.A., Alnuaimia A.S., Al-Jabri K.S., and Al-Harthya A.S., "Evaluation of controlled low strength materials containing industrial by-products", Journal of Building and Environment, Volume 42, Issue 9, 2007, Pages 3366-3372 ,(2007).
14. Naganathan S., Abdul Razak H.,, and Abdul Hamid S.N., "Properties of controlled low-strength material made using industrial waste incineration bottom ash and quarry dust", Journal of Materials & Design, Volume 33, 2012, Pages 56-63 ,(2011).
15. Lianxiang D., Folliard K.J., and Trejo D., "Effects of Constituent Materials and Quantities on Water Demand and Compressive Strength of Controlled Low-Strength Material", Journal of Materials in Civil Engineering, Volume 14, Issue 6 ,(2002).
16. Siddiqueand R., Noumowe A., "Utilization of spent foundry sand in controlled low-strength materials and concrete", Journal of Resources, Conservation and Recycling, Volume 53, Issues 1-2, 2008, Pages 27-35 ,(2008).
17. Bouzalakos S., Dudeney A.W.L. and Cheeseman C.R., "Controlled low-strength materials containing waste precipitates from mineral processing", Journal of Minerals Engineering Volume 21, Issue 4, Pages 252-263, (2008).

18. Lachemi M., Hossain K M.A, Shehata M. and Thaha W., "Characteristics of controlled low-strength materials incorporating cement kiln dust", Canadian Journal of Civil Engineering, 2007, 34:(4) 485-495, (2007).